

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ НАЗНАЧЕНИЯ РЕЖИМОВ ЛАЗЕРНОГО УДАЛЕНИЯ ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ

Лазерная очистка в настоящее время рассматривается как перспективный путь для создания автоматизированных технологий удаления лакокрасочных покрытий (ЛКП) при ремонте авиационной техники [1–3]. Одним из нерешенных вопросов при этом является назначение режимов очистки, которые бы обеспечивали полное удаление ЛКП не повреждая материал обшивки.

Численное моделирование процесса лазерной абляции ЛКП вряд ли может привести к получению практически применимых результатов из-за того, что при таком моделировании необходимо иметь сведения о характеристиках компонентов такого покрытия, достоверные данные о которых отсутствуют. Более того, отсутствуют методики, при помощи которых эти данные могли бы быть получены. Речь идет о коэффициентах теплопроводности, теплоемкости, поглощения излучения и других характеристиках процесса, которые к тому же нелинейно зависят от температуры.

Тем не менее, отсутствие возможности количественной оценки параметров лазерной очистки по результатам расчета не отвергает возможности использования качественных оценок, которые могут быть получены при моделировании процесса абляции. Такие результаты получены в большом количестве работ, в которых исследовалась лазерная абляция материалов с использованием различных моделей и условий обработки. Обзор таких исследований выполнялся в ряде работ, например, [4, 5,6] и др.

Как правило, экспериментаторы определяют с достаточно хорошей точностью толщину слоя h удаленного за импульс материала как функцию дозы облучения Φ :

$$h = h(\Phi), \quad h = \int_0^{\tau} v(t) dt, \quad \Phi = \int_0^{\tau} I(t) dt, \quad (1)$$

где $I(t)$ – интенсивность падающего лазерного излучения.

Как отмечается в [4] зависимость $h(\Phi)$ содержат три характерных участка, относящихся к допороговому процессу ($\Phi < \Phi_a$), абляции в непосредственной близости от порога ($\Phi \sim \Phi_a$) и режиму развитой абляции ($2.5\Phi_a < \Phi < 5\Phi_a$).

Выше порога лазерной абляции ($\Phi > \Phi_a$) при высоких коэффициентах поглощения наблюдается промежуточная линейная зависимость толщины испаренного слоя от дозы облучения [4]:

$$h = \beta(\Phi - \Phi_a), \beta \approx \frac{1-R}{L}, \quad (2)$$

где R – коэффициент отражения излучения; L – скрытая теплота испарения на единицу объема материала.

При высоких дозах лазерного облучения ($2.5\Phi_a < \Phi < 5\Phi_a$) на процесс существенное влияние оказывает экранировка испаряемой поверхности парогазовым облаком продуктов абляции. В этом случае зависимость толщины испаренного слоя от дозы облучения приобретает вид [4]:

$$h = \frac{1}{\alpha_g} \ln \frac{\Phi}{\Phi_g}, \Phi_g = \frac{B}{\ln(\alpha_g A)}, \quad (3)$$

где α_g – эффективный коэффициент поглощения излучения в паре, нормированный на плотность твердого тела.

Зависимости (1) и (2) удовлетворительно описывают экспериментальные данные и в соответствующих координатах зависимости $h(\Phi)$ являются линейными.

Альтернативой натурным экспериментам может быть моделирование лазерной абляции методами молекулярной динамики (МД) [6]. В качестве примера таких результатов на рис. 1 приведены данные расчета количества эжектированных молекул при облучении полимера импульсами лазерного излучения с длиной волны 337 нм длительностью 15 и 150 пс [7]. Значения длительности лазерного импульса в 15 и 150 пс соответствовали случаям локализации напряжений и температуры.

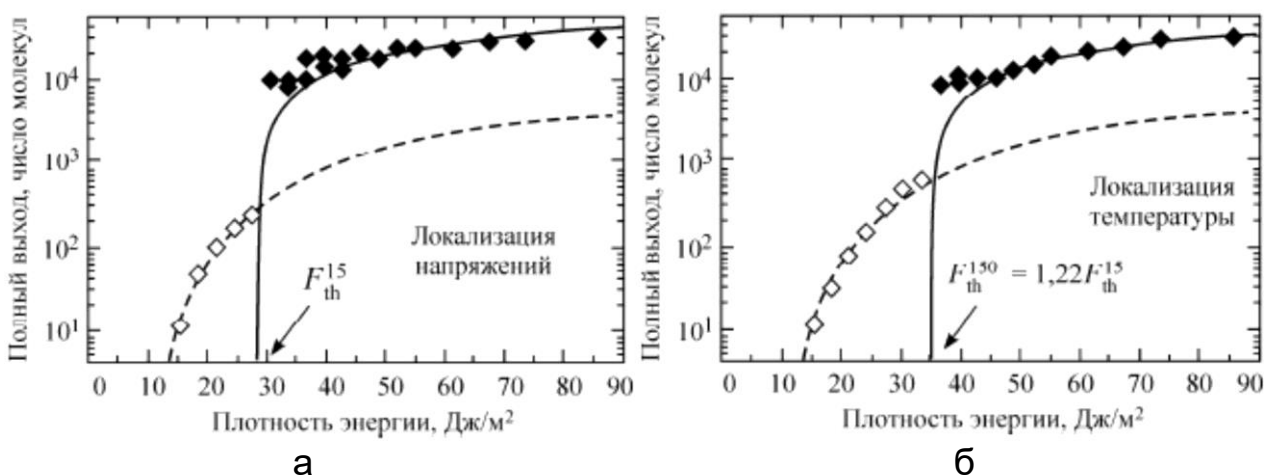


Рисунок 1 – Полный выход в зависимости от плотности поглощенной энергии лазерного излучения: а) при длительности импульса 15 пс; б) при длительности импульса 150 пс [7]

В обоих случаях существуют два различных режима молекулярного выброса, разделенных четко определенной пороговой поглощенной энергией Φ_a . В допороговом режиме количество эжектированных с поверхности мономеров хорошо описывалось уравнением Аррениуса. При превышении порога абляции количество эжектированных молекул резко увеличивается более, чем в 10 раз. Для излучения длительностью 15 пс порог абляции оказался примерно на 20% ниже, чем для случая облучения излучением с длительностью импульса 150 пс. Это может быть объяснено повышением скорости поглощения энергии до величин, при которых при удалении материала становится существенным влияние фотомеханических эффектов

Таким образом, при назначении режимов удаления авиационных лакокрасочных покрытий необходимо исходить из того, что:

- интенсивность лазерного излучения и длительность импульса должны обеспечивать превышение порога абляции для всех материалов, образующих покрытие;

- удаление ЛКП целесообразно вести на режимах, при которых энергия, поглощенная материалом за время импульса находится в интервале $\Phi_a < \Phi < 2\Phi_a$, для которого влияние поглощение излучения парами удаленного материала несущественно;

- количество последовательных импульсов, необходимых для удаления слоя покрытия при известной интенсивности и длительности импульса излучения могут быть определены по зависимостям (2) или (3) с использованием экспериментальных данных по глубине абляции при действии единичного импульса.

Кроме определения интенсивности излучения, длительности импульса и частоты их следования для лазерной очистки поверхности от ЛКП важными являются геометрические параметры обработки, определяющие величину энергии лазерного излучения, приходящуюся на участок поверхности исходя из перекрытия пятен излучения (рис. 2)

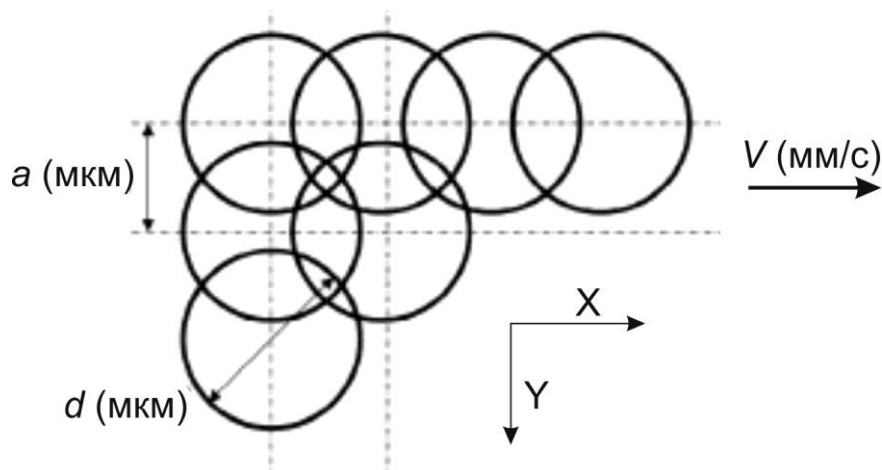


Рисунок 2 – Схема определения геометрических параметров при импульсной лазерной очистке

На схеме, приведенной на рис. 2 направление движения лазерной головки вдоль траектории очистки соответствует оси Y , а сканирование лазерного пучка осуществляется в направлении оси X . Обозначая скорость сканирования V , диаметр пятна излучения d , частоту импульсов g , а смещение развертки a , для величины перекрытия пятна в направлении развертки получим выражение:

$$O_x = 1 - V/dg, \quad (3)$$

а в направлении движения лазерной головки:

$$O_y = 100 - a/d. \quad (4)$$

В случае, приведенном на рис. 2, из-за круглой формы пятна лазерного излучения на поверхности образуются участки, на которые излучение действует один, два и даже три раза. Поэтому возникает задача определения такого положения пятен излучения на поверхности, которое, с одной стороны, обеспечивало бы равномерную качественную очистку поверхности, а с другой – минимальное воздействие на подложку для уменьшения вероятности ее перегрева.

С учетом Гауссовского характера распределения интенсивности излучения по сечению пятна в ходе поглощения излучения в течение импульса его действия порог абляции превышает на некотором расстоянии от края пятна (рис. 3). Величина этого расстояния определяется как характером распределения интенсивности излучения по сечению, так и свойствами материала. Форма абляционного кратера будет определяться объемом, для которого величина поглощенной энергии излучения превысила порог абляции (рис. 4).

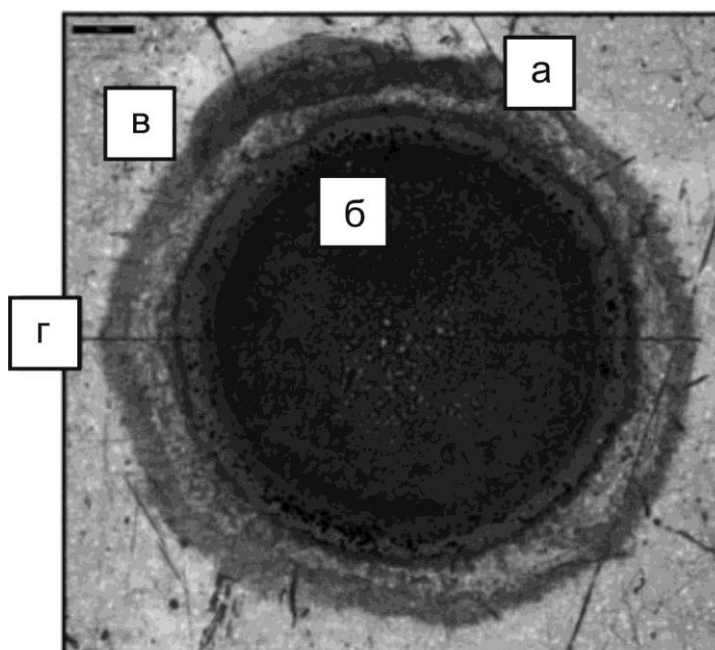


Рисунок 3 – Характерная форма абляционного кратера при воздействии лазерного импульса: а) граница термической зоны; б) зона абляции; в) исходное покрытие; г) линейная зона [8]

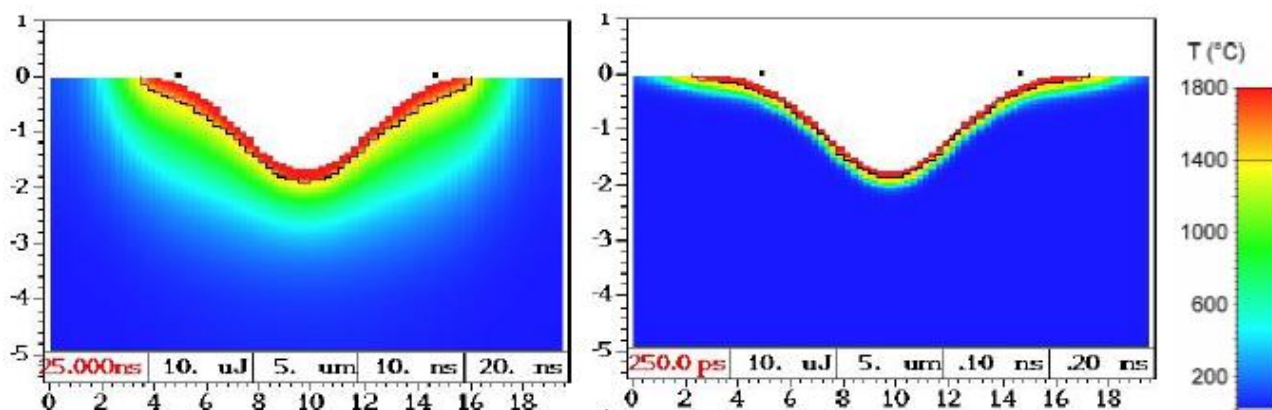


Рисунок 4 – Кратер абляции в кремнии при энергии импульса 10 мДж при длительности импульса 10 нс (слева) и 100 пс (справа) [9]

С учетом этого граничным случаем обработки, при котором обеспечивается абляционный механизм удаления ЛКП со всей поверхности обеспечивается в случае, когда границы абляции четырех соседних пятен пересекаются в одной точке, которую назовем фокусом абляции (рис. 5). В этом случае величины перекрытия пятен по осям совпадают, т.е. $O_x = O_y = O$, а величина O должна быть определена из условия обеспечения максимальной равномерности удаления лакокрасочного покрытия.

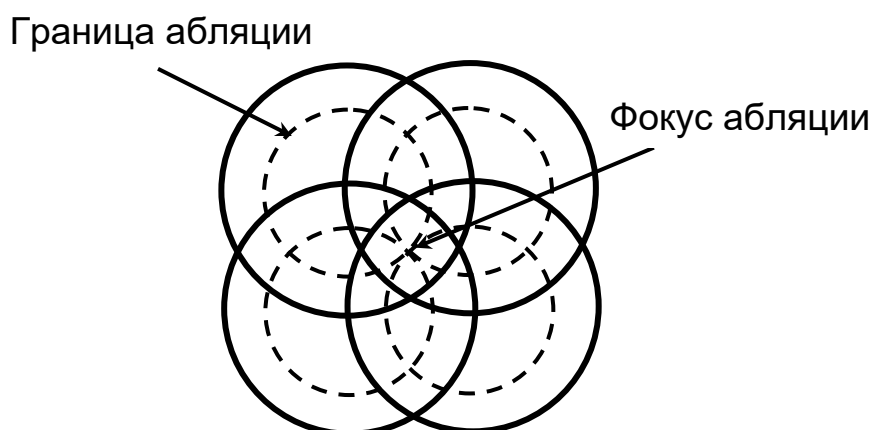


Рисунок 5 – Схема определения границы абляционного режима лазерного удаления лакокрасочного покрытия

С учетом вышеизложенного алгоритм расчетно-экспериментального определения режимов очистки авиационных конструкций из алюминиевых сплавов от ЛКП с использованием импульсного лазерного излучения будет выглядеть следующим образом.

1. Изготавливаются образцы для проведения экспериментов. На каждый образец наносится однослойное покрытие, соответствующее материалам, применяемым при окраске самолета, т.е. грунт и краска. Толщина слоя покрытия на образцах определяется при помощи стандартных методов измерения, например, при помощи ультразвукового

толщиномером.

2. Для каждого типа образцов экспериментальным путем определяется зависимость глубины абляции от поглощенной энергии лазерного излучения. Для этого производится серия воздействий лазерным излучением в режиме единичных импульсов одинаковой длительности. Глубина абляции определяется при помощи любого подходящего способа измерения, например, профилометра. По результатам обработки серии экспериментов определяются неизвестные константы в выражениях типа (2), (3) для последующего использования при вычислении количества импульсов, необходимых для удаления многослойного лакокрасочного покрытия.

3. Для каждого типа образцов экспериментальным путем определяется величина перекрытия пятен, обеспечивающая приблизительно равномерное удаление слоя покрытия в направлении развертки. Для этого производится серия экспериментов для единичной линейной развертки в 10...15 импульсов в диапазоне значений O , от минимального O_{ϕ} , соответствующего образованию фокуса абляции, до $1.2O_{\phi}$.

4. На основании полученных данных выбирается значение перекрытия пятен, интенсивности и длительности импульса излучения, при которых обеспечивается полное удаление лакокрасочного покрытия заданной структуры за 3...5 последовательных проходов.

5. Проводится серия экспериментов на неокрашенном образце по определению критического режима с точки зрения целостности анодированного слоя [10]. Величина интенсивности излучения выбирается наибольшей из ряда, обеспечивающей превышение порога абляции для слоев лакокрасочного покрытия на основании данных, полученных на этапе 2. Определяется длительность импульса излучения $T_{кр}$, при которой при выбранной интенсивности происходит нарушение целостности анодированного слоя. Контроль повреждаемости анодированного слоя ведется визуально при помощи оптического микроскопа.

6. По отношению величины критической интенсивности излучения, определенной на этапе 5, и величины интенсивности излучения, определенной на этапе 4 из условия полного удаления лакокрасочного покрытия заданной структуры за заданное количество проходов определяется величина Ψ по зависимости, предложенной в работе [10]. С учетом того, что в случае перекрытия с образованием фокуса абляции возможно трехкратное воздействие импульса излучения на анодированный слой, исходя из определенного значения Ψ при $n = 3$ определяется допустимая частота f при которой не происходит повреждение анодированного слоя.

7. В случае, если на этапе 6 при выбранной величине интенсивности излучения целостность анодированного слоя при трехкратном действии импульса обеспечить не удается, расчет производится для увели-

ченного значения интенсивности и пропорционально уменьшенного значения длительности импульса излучения исходя из условия сохранения величины поглощенной энергии лазерного излучения. Итерационный процесс ведется до выполнения условия сохранения анодированного слоя.

8. По значению перекрытия пятен, определенном на этапе 4, при длине развертки L по величине f , определенной на этапе 6, частота g вычисляется как:

$$g = f \frac{L}{d(m - O(m - 1))},$$

где m – число пятен, укладываемых в длину развертки.

По полученной таким образом величине g по (3) определяется скорость сканирования, а по (4) – смещение развертки. Таким образом, предложенная методика позволяет установить технологические параметры лазерной очистки от ЛКП: интенсивность, длительность и частоту излучения, скорость сканирования и шаг развертки.

Выводы

1. Интенсивность лазерного излучения при очистке авиационных конструкций от ЛКП должна обеспечивать превышение порога абляции для всех материалов, образующих покрытие. При этом обработку целесообразно вести на режимах, при которых энергия, поглощенная материалом за время импульса находится в интервале $\Phi_a < \Phi < 2\Phi_a$.

2. Количество последовательных импульсов, необходимых для удаления слоя покрытия при известной интенсивности и длительности импульса излучения могут быть определены с использованием экспериментальных данных по глубине абляции при действии единичного импульса.

3. Предложен алгоритм, позволяющий определять технологические параметры импульсной лазерной очистки поверхности деталей из алюминиевых сплавов из условия сохранения анодированного слоя. Для определения допустимых режимов используются экспериментальные данные по определению порога абляции для компонент покрытия и критических параметров обработки анодированного слоя.

Список использованных источников

1. Then, M.J. The Future of Aircraft Paint Removal Methods [Electronic resource] : Master of Science Thesis : Logistics Management / Air Force Institute of Technology. Wright-Patterson AFB, 1989. 169 p. URL: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a214946.pdf>. (last accessed: 02.11.2014).

2. Weissling, D.H., Wiedmann, S.L., Solomon, D.P. A Large-Scale Robotic System for Depainting Advanced Fighter Aircraft [Text] // SAE International Journal of Aerospace. 2011. Vol. 4, iss. 2. P. 1125–1132.

3. Robotic Laser Coating Removal System [Electronic resource] : Final Technical Report / Concurrent Technologies Corp., Oklahoma City Air Logistics Center, Air Force Research Laboratory ; auth. J. Arthur [et al.]. No. WP-0526. Wright-Patterson AFB, 2008. 117 p. URL: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/full-text/u2/a608206.pdf>. (last accessed: 11.02.2015).

4. Анисимов С. И., Лукьянчук Б. С. Избранные задачи теории лазерной абляции // Успехи физических наук. 2002. Т. 172, № 3. С. 301–333.

5. Sobol, E.N. Phase Transformations and Ablation in Laser-Treated Solids [Text] / New York : John Wiley and Sons, 1995. 332 p.

6. Моделирование короткоимпульсной лазерной абляции методом молекулярной динамики: механизмы эжекции материала и формирования наночастиц [Текст] / Л.В. Жигилей и др. // Синтез наноразмерных материалов при воздействии мощных потоков энергии на вещество : монография / А.В. Булгаков и др. Новосибирск : ИТ СО РАН, 2009. Гл. 7. С. 147–220.

7. Zhigilei, L.V., Garrison, B.J. Microscopic mechanisms of laser ablation of organic solids in the thermal and stress confinement irradiation regimes [Text] // Journal of Applied Physics. 2000. Vol. 88, iss. 3. P. 1281–1298.

8. Influenced of threshold fluence, absorption coefficient and thermal loading in laser paint removal mechanisms [Text] / M.K.A.A. Razab, M.S. Jaafar, A.A. Rahman et al. // Environment, Energy and Applied Technology ICIEEE 2014 : proc. of the Int. Conf. on Frontier of Energy and Environment Engineering (Taiwan, Dec. 6–7, 2014). CRC Press, 2015. P. 885–891.

9. Accumulation effects in laser ablation of metals with high-repetition-rate lasers [Text] / G. Raciukaitis, M. Brikas, P. Gecys, M. Gedvilas // High-Power Laser Ablation VII : proc. of SPIE 7005 conf. (Taos, Apr. 20, 2008). SPIE, 2008. P. 2L-1–2L-11.

10. Планковский С. И. Экспериментально-расчетная методика определения ограничений режимов лазерной очистки деталей из алюминиевых сплавов [Текст] / С. И. Планковский, Е. В. Цегельник, П. И. Мельничук, Н. А. Чащин // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов : сб. науч. тр. / Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». Харьков, 2017. Вып. 3 (91). С. 61–70.

Поступила в редакцию 29.11.2017.

*Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.И. Долматов,
Национальный аэрокосмический университет
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков.*